

適応演算を用いた筒内圧検出システムの開発

Development of Cylinder Pressure Measurement System Using Adaptive Calculation

山 本 裕 司*

Yuji YAMAMOTO

小 原 正 徳*

Masanori OHARA

赤 崎 修 介*

Shusuke AKAZAKI

水 野 隆 英*

Takahide MIZUNO

要 旨

内燃機関の燃焼圧力を、比較的安価な多結晶圧電素子で、リアルタイムに計測可能なシステムを構築した。燃焼状態が全運転領域で計測でき、失火検知を高精度におこなえることを、量産車の運転試験において実証した。これまで、多結晶圧電素子は比較的安価ではあるものの、使用環境下での温度特性や耐久劣化などによる出力変化が大きく、量産エンジンへの適用が困難とされてきた。そこで本研究では、センサ出力のばらつきを各要素別に明確にするとともに、適応演算を用いて規範となるモータリング時の推定圧力に一致するように補正パラメータを同定し、温度特性の変化や出力劣化による変化が生じて、安定した筒内圧力を計測可能にした。

ABSTRACT

This paper discusses the development of a system enabling real-time measurements of combustion pressure in an internal combustion engine, using a comparatively low-cost polycrystalline piezoelectric element. Tests conducted using a mass production vehicle showed that by using the measured cylinder pressure, the status of combustion could be measured across the entire range of driving conditions, enabling misfires to be precisely detected. To date, despite their comparatively low cost, the use of piezoelectric elements in mass production vehicles has represented a challenge, because the temperature characteristics of the elements in the use environment, age degradation, and other factors may cause variations in output. This research therefore studied the variation in sensor output in terms of each causal factor. In addition, adaptive calculations were performed to enable the identification of corrective parameters to be used, to match the measured cylinder pressure to estimated reference pressures for vehicle operation, thus enabling stable cylinder pressures to be measured, even if temperature characteristics change or the output deteriorates.

1. まえがき

近年、環境問題がクローズアップされる中、自動車用ガソリンエンジンに、さらなる排ガスの清浄化及び燃焼効率の向上が要求されている。従来のガソリンエンジンでは、触媒の性能を最大限に利用するために、空燃比を高精度に制御するのが一般的であった。さらに制御性を向上するためには、燃焼効率を向上させ、燃焼状態を最適に保つことがもとめられる。そのためには、リアルタイムに各気筒の燃焼状態を計測する筒内圧センサが必要となってくる。しかし、このセンサは、量産化への技術的難易度は高く、長年研究され

ているが、一部を除いて量産化には至っていない^{(1)・(4)}。最近では、構造がシンプルな圧電素子タイプを中心に、ディーゼルエンジンへの適用研究もおこなわれている^{(5)・(6)}。

圧電素子は、大きく単結晶と多結晶の二つに分類される。単結晶圧電素子は、温度特性にすぐれ、低温から高温までのエンジン運転領域で安定した出力が得られる利点があるが、比較的高価であるため、量産エンジンのセンサとしては適していなかった。一方、多結晶圧電素子は、比較的安価ではあるが、温度変化に対し大きく感度に変化する特性を持っている。そのため、温度使用範囲が210℃(-40℃-170℃)を越える自動車用エンジンの筒内圧センサとしては安定し

*四輪開発センター

た出力を得るのが困難であった。

そこで本研究では、多結晶圧電素子の感度変化をソフトウェアにて補正する適応演算型の感度補正手法を考案し、リアルタイムに燃焼状態をモニタ可能とする手法を開発した。これにより多結晶圧電素子を用いて、量産エンジンに適用しても安定した筒内圧力の測定が可能となった。

2. システム構成

2.1. テストエンジン

システム開発には、US 仕向けの ACCORD 3.0 L V6 エンジンを用いた。Table 1 にエンジン諸元を示す。

2.2. 筒内圧センサ

Fig. 1 に示すように、筒内圧センサは、プラグとヘッドの間に共締めする構造とした。その構造を採用したことにより、量産エンジンのバルブ構造を大幅に変更する必要がなくなり、汎用性の高いセンサとなった。

Fig. 2 にセンサ構造を示す。基本構成は、圧電素子を筒状のハウジングに組み込み、ヘッドとプラグ間のひずみをセンシングする簡素な座金構造とした。圧電素子の片方の電極は、センサハウジングにそったターミナルを通して、外部に結線される。この構造により、エンジン組立工場では、

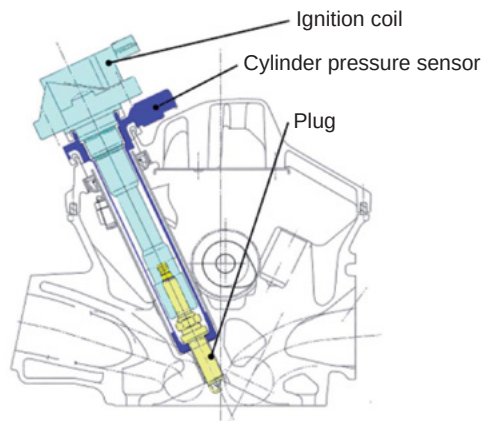


Fig. 1 Installation of cylinder pressure sensor

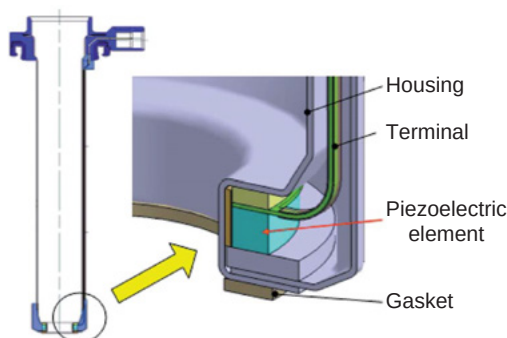


Fig. 2 Cylinder pressure sensor structure

Table 1 Engine specifications

Engine type	V6
Displacement (cm ³)	2997
Bore × stroke (mm)	86 × 86
Compression ratio	10.0
Valve train	24-valve SOHC VTEC
Fuel	Regular unleaded

プラグ組み付けの作業性を損なわずに、センサを組みつけることが可能となった。

筒内圧の検出原理を、Fig. 3 に示す。燃焼圧が発生すると、その圧力に応じて、プラグを押し上げる方向のひずみが発生する。このひずみはプラグを伝播しセンサに到達する。このひずみにより、センサに内蔵した圧電素子に加わっている圧力が変動し、圧電素子は ΔL 微小変形する。その変形により、圧電素子両端で電荷の移動が生じ、その電荷の変化量を検出し、チャージアンプにより電圧へ変換して筒内圧を検出する (Fig. 4)。

2.3. システム構成

システムの構成は、筒内圧センサの信号を高速でリアルタイムに演算処理するため、筒内圧ユニットを新たに開発

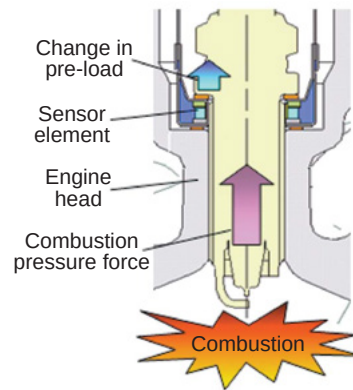


Fig. 3 Pressure sensing mechanism

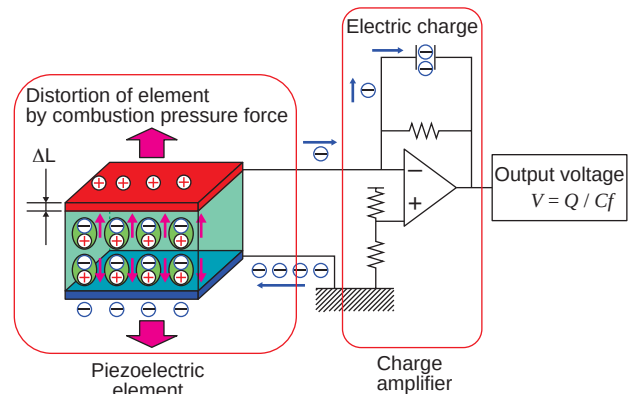


Fig. 4 Function of charge amplifier

し、Engine Control Unit(ECU)に Controller Area Network (CAN)でデータ転送する構成とした。システム構成を Fig. 5 に示す。

筒内圧ユニット内部では、センサ素子の電荷変化をチャージアンプで電圧に変換し、ADコンバータでデジタル信号に変換した後、Central Processing Unit(CPU)に取り込んでいる。また、クランクパルスとシリンダパルスを基にCPU内部でクランク角度を演算し、各クランク角での筒内圧を演算している。今回のプロトタイプユニットでは、100 MHz の CPU を用い、AD コンバータは、50 kHz サンプルリングとした。その結果、回転領域ではレッドゾーンの6800 rpm 回転以上の回転まで、クランク角 1 deg ごとに筒内圧の測定が可能となった。

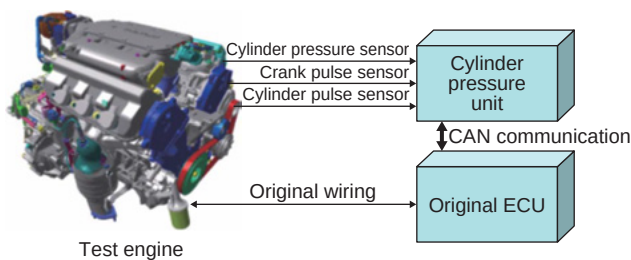


Fig. 5 System configuration for cylinder pressure sensing

3. 適応演算を用いたセンサ出力補正

3.1. センサ感度ばらつき

チタン酸鉛(PbTiO₃)の基本的な特徴として、一般的な多結晶圧電材と同様にペロブスカイト型の結晶構造を持ち、結晶の非対称変位により圧電性(強誘電性)を発現させている。また、圧電定数及び比誘電率が温度上昇と共に比較的大きく増加し、キュリー点付近では急激に増加する。すなわち、温度変化に対する感度特性の変化及び、焦電性が高いことを示している。自動車エンジン用の筒内圧センサとして使用するためには、その他さまざまな変化要因及び、特性劣化要因とその範囲を明確化する必要がある。そこで要因ごとに分け、耐久性を含め、使用環境下でのセンサ感度ばらつきを明確にした。

(1) 初期ばらつき

量産出荷時のばらつき。素子の固体ばらつきや、ケース形状、プレス成型時の荷重ばらつきによる。

(2) 軸力特性

プラグ組み付け時のトルクばらつきや、ねじ部のなじみにより変化する。

(3) 温度特性

温度の変化により圧電定数が変化する。多結晶の圧電素子では、この温度依存性が量産化の壁となっていた。

Table 2 Sensor variation

Initial variation	2500 pC/MPa	±27% *
Axial tension characteristics	Maximum axial tension	+2% *
	Minimum axial tension	-25% *
Temperature characteristics	170 °C	+160% *
	-40 °C	-35% *
Engine revolution characteristics	3000 rpm or more	-44% *
Durability degradation	550000 mile	-30% *

* 3σ variation

(4) ねじ部回転数特性

プラグとヘッドのねじ隙間に入る燃焼圧が、低回転と高回転では変化し、その結果、感度特性が変化する。プラグによる共締め構造としたため、この影響を考慮しなければならない。

(5) 耐久劣化

圧電素子の劣化は、電氣的劣化(圧電性の劣化)と機械的劣化(素子破壊)に大きく分けられるが、機械的劣化については、耐圧での保証とし、電氣的劣化については、環境条件、耐用年数から劣化をもとめた。

3.0 L V6 エンジンでの各ばらつきを Table 2 に示す。それぞれのばらつきは、3σで算出した。

センサ出力の増加側を積上げると、

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= a \times b \times c \times d \\
 &= 2500 \times 1.27 \times 1.02 \times 2.6 \\
 &= 8420
 \end{aligned} \quad (1)$$

a : 初期値センタ b : 初期上限係数
 c : 軸力上限係数 d : 温度特性上限係数

減少側を積上げると

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= a \times e \times f \times g \times h \times i \\
 &= 2500 \times 0.73 \times 0.75 \times 0.65 \times 0.56 \times 0.7 \\
 &= 368
 \end{aligned} \quad (2)$$

a : 初期値センタ e : 初期下限係数
 f : 軸力下限係数 g : 温度特性下限係数
 h : 回転数特性係数 i : 耐久劣化係数

上記式(1)、式(2)の計算結果のように、センサ感度は、368 pC/MPa から 8420 pC/MPa まで変化するので、20 倍以上の感度変化を補正しなければならない。

また、センサの温度が変化すると、圧電定数(感度)の変化だけでなく、比誘電率も変化する。すなわち焦電効果により温度変化でチャージアンプ出力電圧がドリフトする。

この特性を補正するために、Fig. 6 に示すとおり、吸気 TOP でセンサ出力をリセットし、リセット前後の電圧値をモニタし、その傾きを補正することで対応した。

3.2. 適応演算によるセンサ出力補正

多結晶圧電素子の感度特性のばらつきが明確になったので、その感度補正に適応演算を用いリアルタイムに計測する手法について説明する。

一般的にエンジンの筒内圧力センサとして用いられている単結晶圧電素子のキスラ社製センサ(type 6052B)を基準センサとし、基準センサと等しい出力を得る。

センサ出力補正手法の概要を Fig. 7 に示す。

- (1) エンジンの運転状態から、シリンダ内圧力を計算式により求める (P_{model})。
- (2) エンジンのモータリング時の圧力を基準センサより求め、計算で求めたシリンダ内圧を基準センサと一致するように、補正係数で合わせ規範となるモータリング圧力を推定する (P_{modelk})。
- (3) 圧縮行程中の圧力は、燃焼状態が変わっても変化しないことより、(2)で求めた規範モータリング圧力を用いて、センサ信号を適応演算でリアルタイムに補正し、クランク角ごとのシリンダ内圧を得る。

それぞれの項目を詳細に説明すると

- (1) エンジンの運転状態から、エンジンモデルを演算する。
エンジンの構造より、クランク角度とピストン位置は Fig. 8 に示すとおりであり、式(3)で表される。

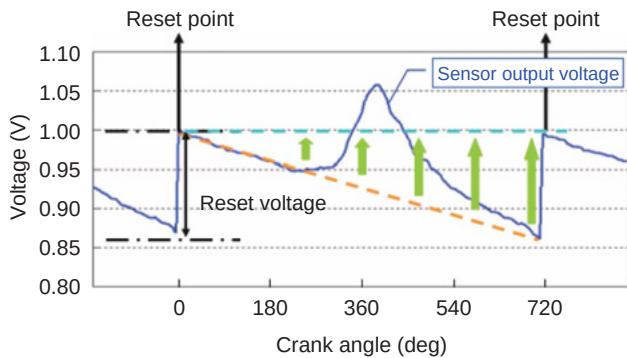


Fig. 6 Reset timing of sensor signal and signal correction

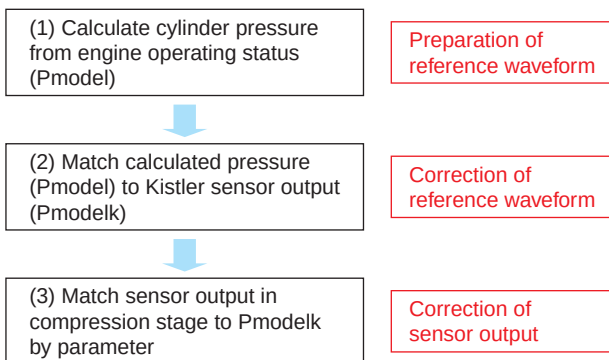


Fig. 7 Method of sensor signal correction

$$x = r \left\{ (1 - \cos \theta) + \lambda - \sqrt{\lambda^2 - \sin^2 \theta} \right\} \quad \because \lambda = l/r \quad (3)$$

従って、シリンダ内の容積 V は式(4)で表される。

$$V = V_{dead} + A_{pstn} \cdot r \left\{ (1 - \cos \theta) + \lambda - \sqrt{\lambda^2 - \sin^2 \theta} \right\} \quad (4)$$

V_{dead} : 死容積 A_{pstn} : ピストン TOP 面積

圧力 P は、気体の状態方程式より式(5)で表される。

$$P = GRT / V \quad (5)$$

G : 吸入空気量 R : 気体定数

T : 吸入空気温度

気体温度は、断熱圧縮より体積 V に応じて変化するため、式(6)となる。

$$P_{model} = GR \frac{T_1}{(V_2/V_1)^{k-1}} / V \quad (6)$$

- (2) 物理モデルと実際に測定した圧力には、気体の分子間力の影響により一致しない。そこで、あらかじめ基準センサで計測した筒内圧力と前述のモデル式が合うように補正項 K_0 , C_0 を用いて補正する。補正後のモデル式は式(7)となり、補正後の P_{modelk} は、基準センサ出力と一致する。比熱比 k は、1.330 を使用した。

$$P_{modelk} = GR \frac{T_1}{(V_2/V_1)^{k-1}} / V \times K_0 + C_0 \quad (7)$$

K_0 , C_0 の補正係数は、Fig. 9 に示すとおり、エンジン回転と吸入空気量のマップとして設定する。

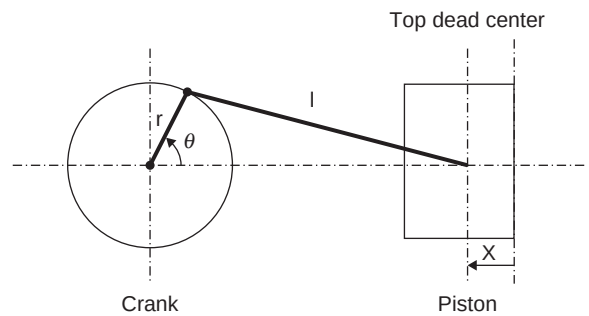


Fig. 8 Crank angle and piston geometry

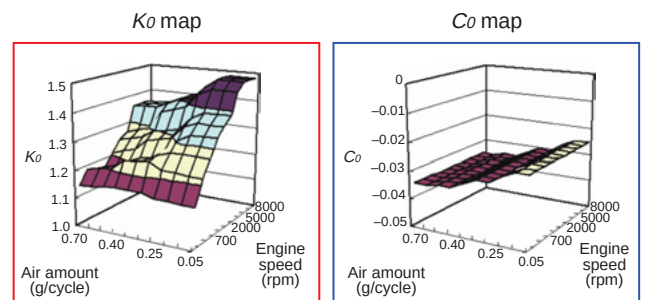


Fig. 9 K_0 , C_0 mapping result

(3)実際に得られたセンサ出力を、エンジンモデル式に同定する手法を説明する。燃焼状態に関係なく、圧縮行程中の圧力はエンジンモデルと一致することを利用し、圧縮行程中の波形をモデル式に合うように同定する。これは、所定の圧縮行程区間の P_{modelk} と計測された筒内圧 P の誤差が式(8)を用いてエラーが最小になるように、最小二乗法を用いておこなう。すなわち、 $P_{modelk} - P \approx 0$ となるように誤差関数 a と b について偏微分し $a = K_1$, $b = C_1$ を導く。

$$\begin{pmatrix} \sum Y(i) \times X(i) \\ \sum Y(i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum X^2(i) & \sum X(i) \\ \sum X(i) & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$a = K_1 = \{n \times \sum Y(i) \times X(i) - \sum X(i) \times Y(i)\} / DET \quad (9)$$

$$b = C_1 = \{-\sum X(i) \times \sum Y(i) \times X(i) + \sum X^2(i) \times \sum Y(i)\} / DET \quad (10)$$

従って、補正後の筒内圧 P は式(11)で表される。

$$P = P' \times K_1 + C_1 \quad (11)$$

4. 実車テスト結果

50 mph 走行時の燃焼100サイクルの波形を Fig. 10, Fig. 11 に示す。エンジン回転は、1500 rpm、吸気管内圧力は、43 kPa である。Fig. 10 は、センサ感度 2000 pC/MPa 品で、Fig. 11は、380 pC/MPa品である。演算で求めた P_{modelk} は、同じ値を示しているが、380 pC/MPa 品は、感度が低

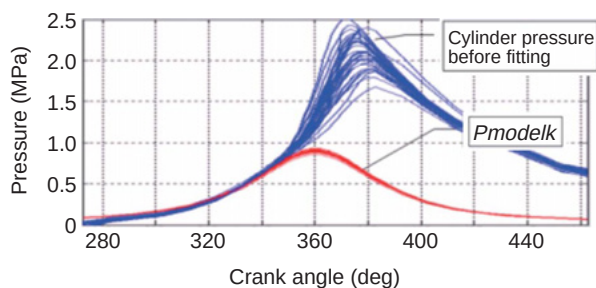


Fig. 10 Cylinder pressure before fitting (Sensor sensitivity: 2000 pC/MPa)

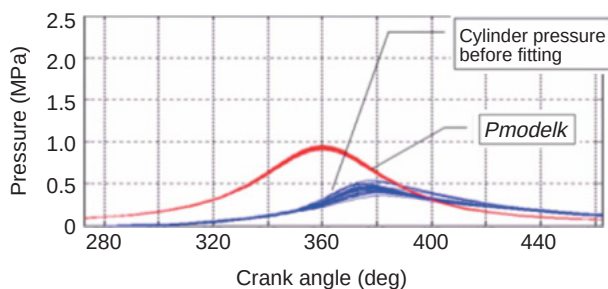


Fig. 11 Cylinder pressure before fitting (Sensor sensitivity: 380 pC/MPa)

いため、得られた筒内圧力が低い結果となっている。

実際に補正をおこなった結果、圧縮行程中の波形を規範モータリング圧力に同定すると、Fig. 12, Fig. 13 となる。圧縮行程中のセンサ圧力は同定前では、圧力が規範圧力にたいしてばらついているが、同定後は、圧縮行程中の波形が規範波形と一致していることがわかる。また、380 pC/MPa 品も補正係数 K_1 で持ち上げられ、2000 pC/MPa と同等の出力が得られる。同定区間は、吸気上死点後 284 deg から 340 deg 区間とした。

実車の運転状態の違い、センサ感度の違いでも同様にリアルタイムに補正が可能である。そこで、センサ感度を600, 1100, 2000 pC/MPa の3種類で、エンジン回転(500 rpm - 4000 rpm)、エンジン負荷(吸気管圧力 20 kPa - スロットル

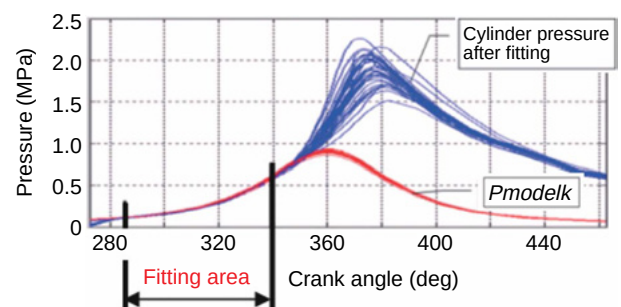


Fig. 12 Cylinder pressure after fitting (Sensor sensitivity: 2000 pC/MPa)

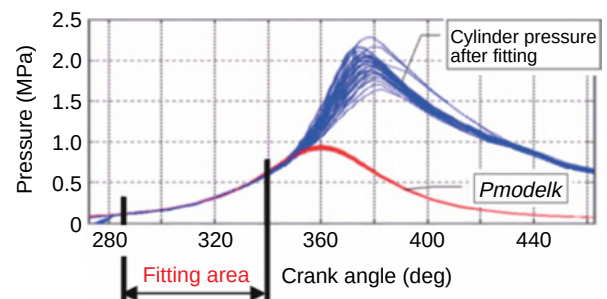


Fig. 13 Cylinder pressure after fitting (Sensor sensitivity: 380 pC/MPa)

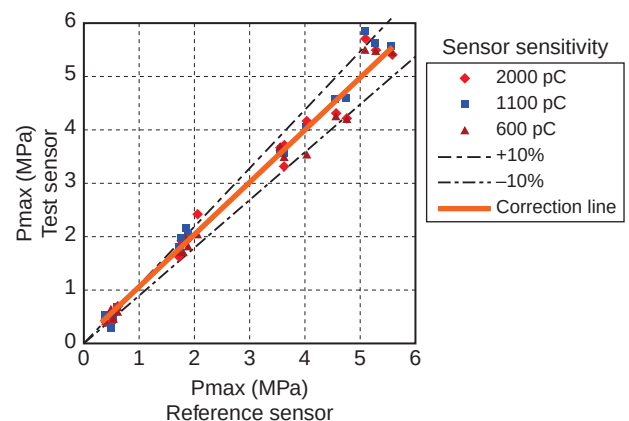


Fig. 14 Pmax comparison between test sensor and reference sensor

全開)の運転条件での、基準センサ出力と本システムで取得した Pmax(最大筒内圧)を比較すると Fig. 14 の通りとなる。基準センサに対して、10%の誤差でデータを取得することができた。

5. 失火検知への応用事例

従来の量産車においては、クランクの角速度変化により、失火を測定しているが、この手法だと気筒数の多いエンジンや、各気筒の燃焼期間が他気筒の燃焼期間と重なるような不等間爆発のエンジンにおいては、失火検出のクライテリアの設定が困難であり、多大な工数がかかる。このような場合においても、本システムでは、各気筒の燃焼毎の筒内圧が判るため、外乱による誤判定も無く安定した失火検知が可能である。Fig. 15に示すとおり、筒内圧は通常燃焼時は燃焼に伴い圧力が上昇するが、失火時は、規範モータリング圧力と一致する。

この特性を利用することにより、燃焼状態がモニタできる。すなわち、式(12)に示すとおり、燃焼区間の筒内圧波形と規範モータリング圧力波形の比を積分することにより失火状態が判定できる。燃焼時は比の積分値が1より大きく、失火時はモータリング圧力となるため、1となる。

$$\text{燃焼区間積分比} = \int \frac{P(\text{Cylinder pressure})}{P(P_{\text{modelk}})} \quad (12)$$

この結果、低温、高温及び、高地環境下で 100%の失火検知性が確保できた。このように安価なセンサを使用した失火検知の実車適合性を証明できた。

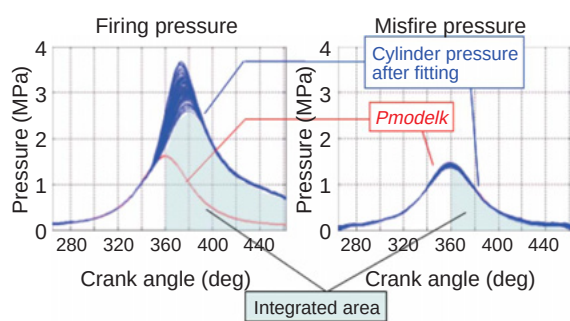


Fig. 15 Difference between firing pressure and misfire pressure

6. まとめ

量産適用可能な多結晶圧電素子を用いて、筒内圧をリアルタイムに計測可能なシステムを構築できたので、筒内圧センサの量産化へ向けた技術の見通しが得られた。

本研究を通じて以下の知見が得られた。

- (1) センサ感度のばらつきを明確にし、その感度変化を自動で補正する適応演算法を確立した。
- (2) リアルタイムに計測した筒内圧力を用いて、量産車の運転試験において、容易に正確に失火検知がおこなえることを実証した。

今後、他の制御への適用範囲を広げるためには、精度向上が必須であり、さらなる研究が必要である。

参考文献

- (1) Kondo, K., Niimi, A., Nakamura, T.: Indiscope-A New Combustion Pressure Indicator with Washer Transducers, SAE Paper, 750883(1975)
- (2) Sawamoto, K., Kawamura, Y., Kita, T.: Individual Cylinder Knock Control by Detecting Cylinder Pressure, SAE Paper, 871911(1987)
- (3) Kusakabe, H., Okauchi, T., Takirawa, M.: A Cylinder Pressure Sensor for Internal Combustion Engine, SAE Paper, 920701(1992)
- (4) Wlodarczyk, M, T.: High Accuracy Glow Plug-integrated Cylinder Pressure Sensor for Closed Loop Engine Control, SAE Paper, 2006-01-0184(2006)
- (5) Hasegawa, M., Shimasaki, Y., Yamaguchi, S., Kobayashi, M., Sakamoto, H., Kitayama, N., Kanda, T.: Study on ignition Timing Control for Diesel Engines Using In-Cylinder Pressure Sensor, SAE Paper, 2006-01-0180(2006)
- (6) Shimasaki, Y., Kobayashi, M., Sakamoto, H., Ueno, M., Hasegawa, M., Yamaguchi, S., Suzuki, T.: Study on Engine Management System Using In-cylinder Pressure Sensor Integrated with Spark Plug, SAE Paper, 2004-01-0519(2004)

■ 著 者 ■



山本 裕 司



赤 崎 修 介



小 原 正 徳



水 野 隆 英